

Al_2O_3 陶瓷蠕动进给超声磨削特性试验研究

江 琴¹ 徐家文²

(1 南京理工大学紫金学院,南京 210046)

(2 南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

文 摘 在改装成的超声磨削机床上进行了陶瓷超声磨削与普通磨削的对比试验,以揭示蠕动进给超声磨削加工的磨削特性及其材料去除机理。结果表明:当超声振动方向与磨削进给方向相同时,超声振动所引起的抛磨作用非常显著,超声磨削的表面粗糙度比机械磨削的低; Al_2O_3 陶瓷在一般条件下超声磨削的去除方式仍属于脆性断裂,以晶粒粉碎、穿晶断裂为主,但伴随有沿晶断裂、弹性划擦、塑性流动等现象。

关键词 超声磨削,工程陶瓷,蠕动进给,磨削特性

Experimental Study on Characteristics of Creep Feed Ultrasonic Grinding Al_2O_3 Ceramics

Jiang Qin¹ Xu Jiawen²

(1 Zijin College Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210046)

(2 College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract Comparative tests of grinding Al_2O_3 ceramics with/w without ultrasonic vibration are carried out on the refitted machine tool with the ultrasonic grinding device to reveal the creep feed grinding characteristics and material removal mechanism. It is indicated that the polishing function is remarkable in the process of creep feed ultrasonic grinding, and the surface roughness processed by ultrasonic grinding is lower than that of conventional mechanical grinding when the direction of ultrasonic vibration is parallel to that of the grinding feed. Al_2O_3 ceramics are removed as brittle fracture in the process of creep feed ultrasonic grinding, and comminuted crystal grain and grain fracture are the main removal modes accompanied by intercrystalline fracture, elastic scratch and plastic flow.

Key words Ultrasonic grinding, Engineering ceramics, Creep feed, Grinding characteristics

1 前言

同传统陶瓷相比,工程陶瓷的韧性和力学性能好。陶瓷零件在使用中发生擦痕时,擦痕两侧也不会发生材料凸起,而是保持原来形状。由于陶瓷材料同时具有高硬度、易脆性和低断裂韧性等特点,使得陶瓷材料加工难度大、加工成本很高(有的甚至可达陶瓷零件制造费用的80%^[1]),但工程陶瓷广阔的应用前景仍使得越来越多的科技工作者致力于工程陶瓷的研制和加工,并取得了显著的成果。大量研究和实验表明^[2~4],在陶瓷加工中引入超声波振动,不仅能够大幅度提高磨削效率,而且可以大大改善工程陶瓷的加工表面质量,降低加工成本。蠕动进给超声磨削将成为超声磨削工程陶瓷的发展趋势^[5]。

陶瓷材料超声磨削是利用材料易脆、受力时裂纹易扩展的特点,对工件或者旋转的砂轮施以超声振

动,使磨粒与工件作机械撞击,从而在工件表面产生脆性破坏,同时在砂轮的磨削作用下去除材料。

为了探讨不同磨削方式下的超声磨削特性与蠕动进给超声磨削的去除机理,试验采用相同的加工工艺参数,分别对96.7% Al_2O_3 陶瓷进行蠕动进给超声磨削和传统机械磨削加工,并对 Al_2O_3 陶瓷磨削表面粗糙度及其扫描电子显微镜(SEM)照片进行对比研究。

2 实验

材料:96.7% Al_2O_3 陶瓷。

电源:交流稳压电源、微机稳压电源。

设备:三相异步交流变频电动机、变频器、数控超声磨削机床、微机。

冷却方式:自来水。

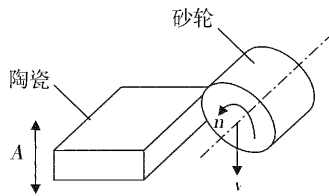
超声波发生器频率 $f=20$ kHz,工件振幅 $A=5\sim 12\mu\text{m}$ 。

磨削方式:见图1。

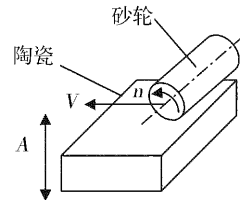
收稿日期:2005-10-24;修回日期:2006-05-08

基金项目:江苏省自然科学基金资助(BK2001048)

作者简介:江琴,1977年出生,硕士研究生,主要从事特种加工新技术研究



(a) 超声振动方向与磨削平面平行,与 v 平行



(b) 超声振动方向与磨削平面垂直,与 v 垂直

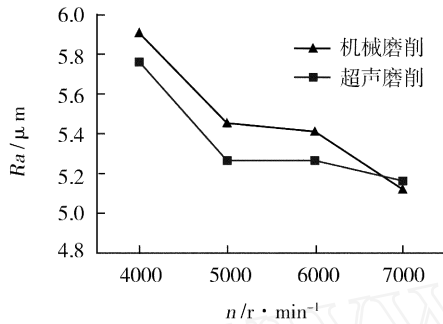
图 1 两种不同的磨削方式

Fig 1 Two different grinding methods

3 结果及分析

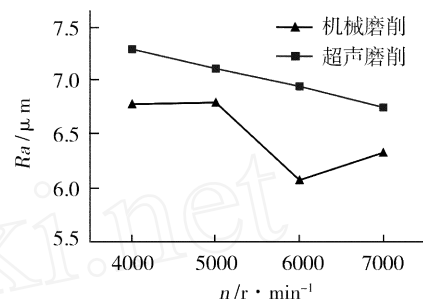
3.1 两种磨削方式的实验结果

图 2 是在如图 1 所示的磨削方式下磨削表面粗糙度随砂轮转速的变化规律。图 2(a)的磨削条件是:电镀金刚石砂轮 $180^\#$ (磨粒尺寸 $96 \sim 63 \mu\text{m}$),浓



(a) 超声振动方向与砂轮进给方向相同

度 75%,直径 15.5 mm;机床进给速度 $v = 1 \text{ mm/m in}$;设定磨削深度 $d = 0.1 \text{ mm}$ 。图 2(b)的磨削条件是:电镀金刚石砂轮 $120^\#$ (磨粒尺寸 $125 \sim 106 \mu\text{m}$),浓度 75%,直径 3 mm;机床进给速度 $v = 1 \text{ mm/m in}$;设定磨削深度 $d = 0.4 \text{ mm}$ 。



(b) 超声振动方向与砂轮进给方向垂直

图 2 表面粗糙度与转速的关系

Fig 2 Relationship between surface roughness and rotation speed

由图 2(a)可知,加工平面的粗糙度随转速的增大而减小。当转速 $n < 7000 \text{ r/min}$ 时,超声磨削的表面粗糙度小于机械磨削;但是当转速 $n = 7000 \text{ r/min}$ 时,超声磨削的表面粗糙度略高于机械磨削。由图 2(b)可知,超声磨削的表面粗糙度随转速的增大而减小,机械磨削的表面粗糙度随转速的增大总趋势是减小,但是中间有波动。与采用图 1(a)所示的磨削方式进行加工的规律相反,采用如图 1(b)所示的磨削方式,超声磨削的表面粗糙度反而高于机械磨削。

分析图 2(a)和 (b)实验结果形成的原因,认为当超声振动方向与进给方向相同时,工件振动与砂轮进给运动方向平行,与磨削平面也平行,故工件与砂轮之间不会发生径向撞击,而是进行与超声振动本身相同的抛磨作用,致使表面粗糙度降低。当超声振动方向与进给方向垂直时,超声振动方向与磨削平面垂直。因而随着工件的超声振动,砂轮与工件高频机械撞击,工具杆(砂轮轴)受到刚性冲击,产生挠性变形,俗称“让刀”。在磨削过程中高频撞击粉碎加工表面,从而使表面更加粗糙。

由于在超声振动方向与进给方向垂直的磨削过程中,砂轮受到工件的高频撞击,运动稳定性变差,砂轮跳动加剧,砂轮磨粒的不等高性被放大,从而使工

件表面粗糙度增大。故采用图 1(b)磨削方式磨削加工,其表面粗糙度比采用图 1(a)大。

综上所述,采用图 1(a)磨削方式加工,砂轮受迫振动小,抛磨作用显著,故超声磨削的表面粗糙度低于机械磨削;采用图 1(b)磨削方式磨削,超声振动使砂轮受迫振动剧烈,超声磨削的表面粗糙度比机械磨削的还要高。

3.2 超声磨削与机械磨削的材料去除特性

采用图 1(a)磨削方式磨削,超声振动有助于改善陶瓷磨削表面的粗糙度,为了进一步探讨超声振动方向与进给方向相同时磨削中材料的去除机理,对其磨削表面放大 3000 倍的 SEM 照片(图 3,砂轮转速为 6000 r/min)进行对比研究。

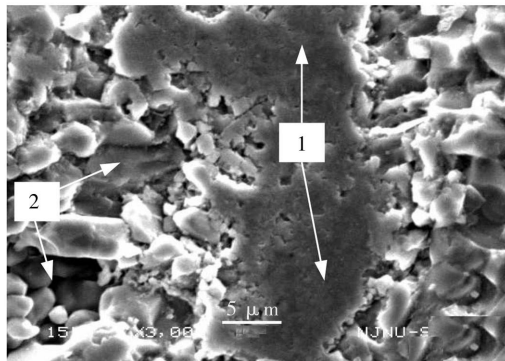
在超声振动磨削中,随着砂轮转速即砂轮线速度的增大,单位时间内砂轮磨粒的平均磨削厚度减小,磨粒切削负荷减小,磨削力减小,磨出工件的表面粗糙度减小。

宏观上,采用超声振动方向与进给方向相同,与机床进给方向平行,在一定转速范围内(砂轮的转速小于 6000 r/min),单位时间内磨削同一点的次数即抛光次数较多,磨削表面粗糙度小,故超声磨削过程中抛磨作用明显。但是随着砂轮转速的提高,高速旋转时磨削中有强迫振动(磨削装置旋转部件不平衡而引起)、低频共

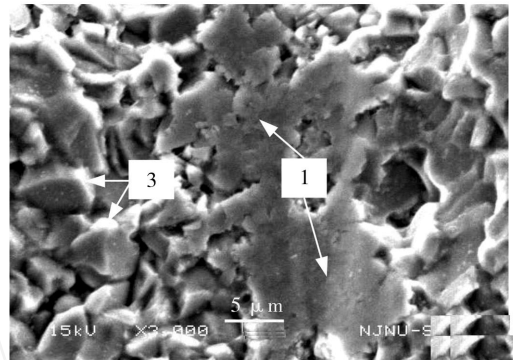
振(由于强迫振动频率与系统固有频率相近而引起的)和 高频自激振动等产生,使得超声振动所引起的抛磨作用不明显。从而超声磨削的表面粗糙度与机械磨削的接近,甚至略高一点[图 2(a)],当砂轮转速 $n=7\ 000\ \text{r}/\text{min}$ 时的表面粗糙度)。

微观上,陶瓷的机械磨削(传统磨削)不同于金属。在机械磨削过程中,材料塑性去除在磨削过程中一般会产生塑性变形,是在切应力作用下由位错运动引起的密排原子面间的滑移造成的。产生的滑移面和滑移方向越多,在外力作用下滑移的机会就越多。陶瓷材料的滑移系统非常少,因为陶瓷主要是以离子

键和共价键结合起来的,具有明显的方向性和饱和性,同性离子相遇,斥力增大,故滑移很困难。因此,陶瓷磨削很难产生塑性磨削。又因陶瓷材料的硬度高、有气孔、粗大晶粒与晶界的结合力较弱,在磨粒的作用下,不能产生塑性变形的粗大晶粒(Al_2O_3 陶瓷组织包括主晶相 $-\text{Al}_2\text{O}_3$ 和多相共晶组织,由这两种组织组成的粗大晶粒粒径有的高达 $100\ \mu\text{m}$)可能从结合力较弱的晶界处断裂。这种晶粒沿结合强度较小的晶界处断裂的方式称为沿晶断裂。晶粒剥落多属于沿晶断裂。沿晶断裂的微粒脱离工件表面形成较大的凹坑[图 3(a)中 2 箭头所指]。



(a) 机械磨削



(b) 超声磨削

图 3 Al_2O_3 陶瓷磨削表面特征

Fig 3 Surface characteristics of ground Al_2O_3 ceramics

1 - 犁沟; 2 - 沿晶断裂; 3 - 穿晶断裂。

在砂轮磨粒凸出的磨削平面上,因磨削深度较大,在强度较高、塑性较大的多相共晶组织处发生塑性蠕变,其磨削过程以刻划为主,沿着磨削速度方向出现犁沟[图 3(a)中 1 箭头所指区域]。

在超声磨削中,当转速在 $4\ 000 \sim 6\ 000\ \text{r}/\text{min}$ 时,由于陶瓷的抗震性较差,超声振动使 Al_2O_3 陶瓷晶粒中产生应力,在晶粒内部、晶界处都可能有应力集中的地方。随着应力的集聚, Al_2O_3 陶瓷的力学性能变差。在磨削力的作用下,工件表面的微粒容易沿着应力集中的地方断裂。材料去除沿着晶粒体断裂的方式称为穿晶断裂。本实验采用的是 $96.7\% \text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷(Al_2O_3 晶粒尺寸范围为 $8 \sim 35\ \mu\text{m}$),陶瓷的气孔少、致密性好,因此,断裂方式中既有穿晶断裂(应力集中在晶粒内部),也有沿晶断裂;由图 3(b)可以看出超声磨削中,磨削表面无明显凹坑, Al_2O_3 晶粒已被粉碎成更细小的晶粒。且许多晶粒被磨削成小平台[图 3(b)中 3 箭头所指],表明磨削过程中材料去除不是成块剥落,而是穿晶断裂,同时还可以看到超声磨削表面有明显的塑性流动。同机械磨削一样,超声磨削表面在磨削速度方向上也出现宽约 $10\ \mu\text{m}$ 左右的犁沟[图 3(b)中 1 箭头所指区域]。

对比机械磨削和超声磨削表面 SEM 照片中的犁沟(图 3 中 1 箭头所指区域),可以看出图 3(a)中的犁沟表面比图 3(b)中的犁沟表面黑,黑色物质很像

“积碳层”。分析其原因可能是在机械磨削过程中产生的热量比超声磨削的高很多,致使金刚石砂轮碳化。碳化后的磨粒在砂轮与工件摩擦形成犁沟的过程中脱落后留在犁沟表面形成“积碳层”。

4 结论

(1) 超声振动磨削中,当工件振动方向与磨削平面平行,与砂轮进给方向也平行时,砂轮运转平稳,抛磨作用显著;超声磨削的表面粗糙度低于机械磨削的。

(2) 当工件振动方向与磨削平面垂直时,超声振动不利于降低磨削表面粗糙度。

(3) 蠕动进给超声磨削 Al_2O_3 陶瓷的去除方式仍属于脆性断裂,以晶粒粉碎、穿晶断裂为主,但伴随有沿晶断裂、弹性划擦、塑性流动等现象。

参考文献

- 1 胡军,徐燕申,林彬.工程陶瓷镜面磨削新方法及其机理的研究.精密制造与自动化,2004;(2):11~14
- 2 周志平,刘劲松.高温结构陶瓷的磨削去除机理及磨削加工技术.工具技术,2004;28(8):71~74
- 3 杨继先,张永宏.超声振动磨削陶瓷深孔试验研究.兵器材料科学与工程,1998;21(3):41~44
- 4 Babitsky V I, Mitofanov A V, Silberschmidt V V. Ultrasonically assisted turning of aviation materials: simulations and experimental study. Ultrasonics, 2004; 42: 81~86
- 5 杜建华,刘永红,李小明等.工程陶瓷材料磨削加工技术.机械工程材料,2005;29(3):1~3 (编辑 李洪泉)